

УДК 621.3.078.001

**СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО СТАБИЛИЗАТОРА ПОЛЯ ЗРЕНИЯ ПРИБОРА НАБЛЮДЕНИЯ**

**Т. Е. Александрова, А. А. Лазаренко, А. В. Зейн**

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»  
ул. Фрунзе, 21, Харьков, 61002, Украина. E-mail: alexandrova.t@mail.ru.

Рассматривается проблема выбора структуры и числовых значений параметров алгоритма стабилизации поля зрения прибора наблюдения. Показано, что построение цифрового ПД-стабилизатора поля зрения с использованием фильтров Баттеруорта и Ланцоша целесообразно осуществлять по последовательно-параллельной схеме, когда на вход фильтра Ланцоша поступает отфильтрованный от высокочастотных помех выходной сигнал фильтра Баттеруорта. Использование фильтров Баттеруорта и Ланцоша приводит к существенному уменьшению искажения передаваемого сигнала.

**Ключевые слова:** стабилизатор поля зрения, цифровой фильтр, ПД-стабилизатор, амплитудно-частотная характеристика, фазо-частотная характеристика.

**СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНОГО СТАБІЛІЗАТОРА ПОЛЯ ЗОРУ ПРИБОРУ СПОСТЕРЕЖЕННЯ**

**Т. Є. Александрова, А. О. Лазаренко, А. В. Зейн**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»  
вул. Фрунзе, 21, Харків, 61002, Україна. E-mail: alexandrova.t@mail.ru.

Розглядається проблема вибору структури й числових значень параметрів алгоритму стабілізації поля зору приладу спостереження. Показано, що побудова цифрового ПД-стабілізатора поля зору з використанням фільтрів Баттеруорта і Ланцоша доцільно здійснювати за послідовно-паралельною схемою, коли на вхід фільтра Ланцоша надходить відфільтрований від високочастотних перешкод вихідний сигнал фільтра Баттеруорта. Використання фільтрів Баттеруорта і Ланцоша призводить до суттєвого зменшення спотворення переданого сигналу.

**Ключові слова:** стабілізатор поля зору, цифровий фільтр, ПД-стабілізатор, амплітудно-частотна характеристика, фазо-частотна характеристика.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Приборы наблюдения подвижных технических объектов часто имеют стабилизированное поле зрения, сохраняющее неподвижное направление в пространстве в процессе движения объекта [1]. В работе [2] рассмотрен аналоговый электромеханический стабилизатор поля зрения прибора наблюдения и произведена оценка точности стабилизатора при различных законах стабилизации. Задающим элементом стабилизатора является трехстепенный гироскоп, внешняя рамка которого сохраняет неизменное направление в пространстве. Вместе с тем, в работе [3] показано, что рамки гироскопа, установленного на подвижном основании, совершает высокочастотные колебания. При отыскании производной по времени стабилизируемой величины, зашумленной высокочастотной помехой, возникает ошибка, снижающая помехозащищенность стабилизатора. При использовании цифровых стабилизаторов помехозащищенность системы стабилизации ещё более возрастает в связи с квантованием по времени стабилизируемой величины и получением её первой разности.

Целью настоящей работы является разработка структуры алгоритма, реализуемого цифровым стабилизатором поля зрения прибора наблюдения, и отыскание значений констант алгоритма.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Передаточная функция непрерывной части электромеханического стабилизатора поля зрения прибора наблюдения получена в работе [2] и записывается в виде

$$W_o(s) = \frac{k_o}{s(T_e s + 1)}, \quad (1)$$

где  $T_e$  – постоянная времени исполнительного электродвигателя.

Передаточную функцию цифрового ПД-стабилизатора зададим в виде

$$W_s(z) = k_\phi + \frac{k_\phi(z-1)}{Tz}, \quad (2)$$

где:  $T$  – период квантования;  $k_\phi$  и  $k_{\dot{\phi}}$  – варьируемые константы алгоритма стабилизации. Тогда характеристическое уравнение замкнутого дискретного стабилизатора записывается:

$$z^3 - \left[ a_3 - k_o \left( k_\phi + \frac{k_{\dot{\phi}}}{T} \right) a_1 \right] z^2 + \left[ a_4 - k_o \frac{k_{\dot{\phi}}}{T} a_1 - k_o \left( k_\phi + \frac{k_{\dot{\phi}}}{T} \right) a_2 \right] z + k_o \frac{k_{\dot{\phi}}}{T} a_2 = 0, \quad (3)$$

где введены следующие обозначения:

$$a_1 = T_d \left( e^{\frac{nT}{T_d}} - 1 \right) + T; \quad a_2 = T_d \left( e^{\frac{nT}{T_d}} - 1 \right) + Te^{\frac{nT}{T_d}}; \quad a_3 = e^{\frac{nT}{T_d}} + 1; \quad a_4 = e^{\frac{nT}{T_d}}.$$

Величина коэффициента усиления  $k_o$  непрерывной части системы отрицательна в связи с тем, что поворот основания, на котором установлен прибор наблюдения, на некоторый угол вызывает поворот главного зеркала прибора в противоположную сторону с целью сохранения неизменного направления в пространстве поля зрения.

Связь между комплексными переменными  $s$  и  $z$  преобразования Лапласа и  $Z$ -преобразования, соответственно, определяется выражением [4]

$$z = e^{sT}. \quad (4)$$

В выражении (4) произведем замену  $s = j\omega$ . В результате получаем:

$$\begin{aligned} z &= e^{j\omega T} = \cos \omega T + j \sin \omega T; \\ z^2 &= e^{2j\omega T} = \cos 2\omega T + j \sin 2\omega T; \\ z^3 &= e^{3j\omega T} = \cos 3\omega T + j \sin 3\omega T. \end{aligned} \quad (5)$$

Подставим соотношения (5) в характеристическое уравнение (3), выделим действительную часть и приравняем их нулю. В результате получили два линейных алгебраических уравнения относительно варьируемых констант  $k_\phi$  и  $k_\psi$ :

$$\begin{aligned} k_\phi A(\omega T) + k_\psi B(\omega T) &= C(\omega T); \\ k_\phi D(\omega T) + k_\psi E(\omega T) &= F(\omega T), \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} A(\omega T) &= -k_o \cos 2\omega T + k_o \cos \omega T; \\ B(\omega T) &= -k_o \frac{a_1}{T} \cos 2\omega T + \\ &+ k_o \frac{a_1 + a_2}{T} \cos \omega T - k_o \frac{a_2}{T}; \\ C(\omega T) &= -\cos 3\omega T + a_3 \cos 2\omega T - a_4 \cos \omega T; \\ D(\omega T) &= -k_o \sin 2\omega T + k_o \sin \omega T; \\ E(\omega T) &= -k_o \frac{a_1}{T} \sin 2\omega T + k_o \frac{a_1 + a_2}{T} \sin \omega T; \\ F(\omega T) &= -\sin 3\omega T + a_3 \sin 2\omega T - a_4 \sin \omega T. \end{aligned}$$

Решение системы (6) записывается в виде

$$\begin{aligned} k_\phi &= \frac{C(\omega T)E(\omega T) - F(\omega T)B(\omega T)}{A(\omega T)E(\omega T) - D(\omega T)B(\omega T)}; \\ k_\psi &= \frac{A(\omega T)F(\omega T) - D(\omega T)C(\omega T)}{A(\omega T)E(\omega T) - D(\omega T)B(\omega T)}. \end{aligned} \quad (7)$$

С помощью соотношений (7) построим в плоскости варьируемых констант ( $k_\phi, k_\psi$ ) область устойчивости цифрового стабилизатора, представленную на рис. 1. Значение параметров стабилизатора при этом принимаются равными:  $k_o = -1$ ;  $T_c = 0,2$  с;  $T = 0,04$  с.

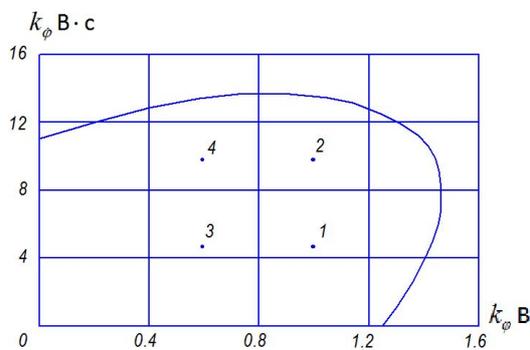


Рисунок 1 – Область устойчивости замкнутой системы стабилизации

Рассмотрим дискретную передаточную функцию замкнутого стабилизатора

$$W(z) = \frac{W_{po}(z)}{1 + W_s(z)W_{po}(z)}. \quad (8)$$

С учетом соотношений (5) выражение (8) принимает вид:

$$W(j\omega T) = \frac{k_o [P(\omega T) + jQ(\omega T)]}{R(\omega T) + jS(\omega T)}, \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} P(\omega T) &= a_1 \cos 2\omega T - a_2 \cos \omega T; \\ Q(\omega T) &= a_1 \sin 2\omega T - a_2 \sin \omega T; \\ R(\omega T) &= -C(\omega T) + k_\phi A(\omega T) + k_\psi B(\omega T); \\ S(\omega T) &= -F(\omega T) + k_\phi D(\omega T) + k_\psi E(\omega T). \end{aligned}$$

Используя формулу (9), запишем соотношение для расчета АЧХ и ФЧХ цифрового стабилизатора

$$\begin{aligned} M(\omega T) &= |k_o| \sqrt{\frac{P^2(\omega T) + Q^2(\omega T)}{R^2(\omega T) + S^2(\omega T)}}; \\ \psi(\omega T) &= \arctg \frac{R(\omega T)Q(\omega T) - P(\omega T)S(\omega T)}{[P(\omega T)R(\omega T) + Q(\omega T)S(\omega T)]}. \end{aligned}$$

На рис. 2 приведены АЧХ и ФЧХ цифрового стабилизатора, соответствующие точкам 1, 2, 3 и 4 области устойчивости, приведенной на рис. 1. Анализ этих характеристик позволяет сделать вывод, что ПД-стабилизатор с передаточной функцией (2) приводит к значительным искажениям передаваемого сигнала, а именно: к подавлению амплитуд в области рабочих частот и к значительному фазовому запаздыванию также в области рабочих частот. Для уменьшения этих искажений целесообразно использовать в ПД-стабилизаторе цифровые фильтры Баттеруорта и Ланцоша [5].

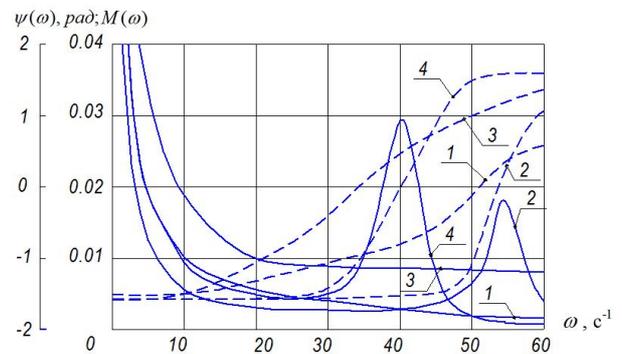


Рисунок 2 – АЧХ и ФЧХ замкнутой системы стабилизации

Пусть дискретные передаточные функции фильтров Баттеруорта и Ланцоша записываются в виде:

$$W_b(z) = \frac{a_1(1 + 2z^{-1} + z^{-2})}{1 + d_1z^{-1} + d_2z^{-2}}; \quad (10)$$

$$W_l(z) = \tilde{n}_0 + \tilde{n}_1z^{-1} - \tilde{n}_1z^{-3} - \tilde{n}_0z^{-4}. \quad (11)$$

Тогда дискретная передаточная функция цифрового стабилизатора может быть представлена:

$$W_s(z) = k_\phi W_b(z) + k_\psi W_l(z). \quad (12)$$

В соотношениях (10) и (11) положим параметры фильтров равными  $a_1 = 0,05445$ ;  $d_1 = -1,24011$ ;  $d_2 = 0,45792$ ;  $c_0 = 5$ ;  $c_1 = 2,5$  и построим АЧХ и ФЧХ стабилизатора (12) при  $k_\varphi = 1$  и при различных значениях константы  $k_\psi$ , приведенные на рис. 3. Анализ этих кривых позволяет сделать вывод о том, что использование в цифровых ПД-стабилизаторах фильтров (10) и (11) приводит к значительному уменьшению искажений передаваемого сигнала.

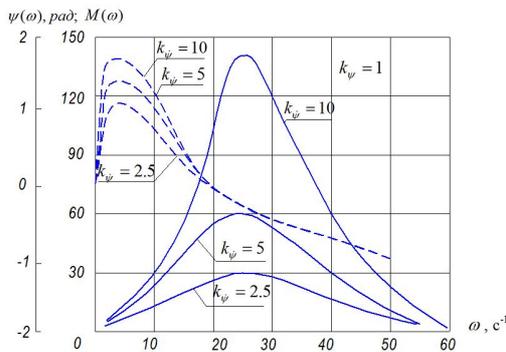


Рисунок 3 – АЧХ и ФЧХ ПД-стабилизатора с цифровыми фильтрами

**ВЫВОДЫ.** Структура цифрового электромеханического стабилизатора поля зрения прибора наблюдения должна включать цифровые низкочастотные фильтры Баттеруорта и Ланцоша. Использова-

ние фильтров Баттеруорта и Ланцоша приводит к существенному уменьшению искажения передаваемого сигнала.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Александров С.С., Аблесимов О.К., Александрова Т.Е. Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами. Т. 3. Автоматичне керування озброєнням танків. – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – 444 с.
2. Александров Е.Е., Александрова Т.Е. Оценка точности электромеханического индикаторного стабилизатора поля зрения прибора наблюдения // Электротехнічні та комп'ютерні системи. – 2011. – № 3 (79). – С. 339–341.
3. Александров Е.Е., Александрова Т.Е., Лазаренко А.А. Оценка точности стабилизации поля зрения прицела танковой пушки // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2011. – № 3. – С. 48–51.
4. Александров С.С., Козлов Е.П., Кузнецов Б.И. Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами. Т.1. Теорія автоматичного керування. – Харків: НТУ «ХПІ», 2002. – 490 с.
5. Александрова Т.Е., Кононенко В.А., Лазаренко А.А. Сравнительный анализ цифровых ПД-стабилизаторов подвижных объектов с низкочастотными фильтрами Баттеруорта и Ланцоша // Радиоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2011. – № 2. – С. 148–152.

STRUCTURAL-PARAMETRIC SYNTHESIS OF DIGITAL ELECTROMECHANICAL STABILIZER SIGHT SURVEILLANCE DEVICE

T. Aleksandrova, A. Lazarenko, A. Zane

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"  
ul. Frunze, 21, Kharkov, 61002, Ukraine. E-mail: alexandrova.t@mail.ru.

The problem of choice of the structure and the numerical values of the parameters of the algorithm stability field of view of observation. It is shown that the construction of a digital PD-regulator of the field of view using a Butterworth filter, and it is advisable to carry out the Lanczos sequence in a parallel circuit when the input filter Lanczos filtered comes from the high-frequency noise output of the filter Butterworth. The use of Butterworth filter and Lanczos results in a significant decrease in the distortion of the transmitted signal.

**Key words:** stabilizer of a field of view, the digital filter, PD-regulator, frequency response, phase-frequency characteristic.

REFERENCES

1. Aleksandrov E.E., Ablesimov D.C., Aleksandrova I.E. *Automatic control of moving objects and processes*. Vol. 3. Automatic control arms tanks. – Kharkov: NTU "KhPI", 2008. – 444 p. [in Ukrainian]
2. Aleksandrov E.E., Aleksandrova T.E. The accuracy estimation of the electromechanical indicator stabilizer field of view of observation // *Electrical and Computer Systems*. – 2011. – № 3 (79). – PP. 339–341. [in Russian]
3. Aleksandrov E.E., Aleksandrova T.E., Lazarenko A.A. Estimates of the accuracy of sight stabilization tank gun sight // *Artillery and Small Arms*. – 2011. – № 3. – PP. 48–51. [in Russian]
4. Aleksandrov E.E., Kozlov E.P., Kuznetsov B.I. *Automatic control of moving objects and technological processes*. Vol. 1. Theory of automatic control. – Kharkov: NTU "KhPI", 2002. – 490 p. [in Ukrainian]
5. Aleksandrova T.E., Kononenko V.A., Lazarenko A.A. Comparative analysis of digital PD-stabilizers of moving objects with low-frequency filters Butterworth and Lanczos // *Radioelectronics. Information. Management*. – 2011. – № 2. – PP. 148–152. [in Russian]

Стаття надійшла 1.06.2012.  
Рекомендовано до друку  
к.т.н., доц. Сергіємком С.А.